

文章编号: 1001-3806(2002)02-0144-03

Cr⁴⁺: YAG 调 Q 的 SBS 激光器*

刘丹平 冯国英 欧群飞 李存智

钟 鸣 孙年春

(四川大学光电系, 成都, 610064)

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 对在 SBS 调 Q 的 YAG 激光器中加入 Cr⁴⁺: YAG 的情况进行了计算模拟和实验研究, 证明两种被动调 Q 的适当结合, 可明显地提高系统的稳定性。

关键词: SBS 调 Q; YAG 激光器; Cr⁴⁺: YAG; SBS 相位共轭

中图分类号: TN248.1+3 文献标识码: A

Cr⁴⁺: YAG Q-switched SBS laser

Liu Danping, Feng Guoying, Ou Qunfei, Li Cunzhi

(Department of Electro-optics Sichuan University, Chengdu, 610064)

Zhong Ming, Sun Nianchun

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: A Cr⁴⁺: YAG Q-switched SBS laser has been studied experimentally and calculated numerically. The results prove that appropriate combination of two passive Q-switched can enhance the laser's stability.

Key words: SBS Q-switched; YAG laser; Cr⁴⁺: YAG; SBS phase conjugation

引 言

受激布里渊散射由于它的后向散射光相对于入射光有着相位复共轭关系和较小的频移量及自调 Q 等特点, 使之作为相位共轭镜而应用于激光腔, 获得具有较好的空间模式的激光脉冲, 近年来得到了广泛的研究^[1~3]。而 Cr⁴⁺: YAG 晶体具有良好的热学性能、机械性能和光学性能, 在红外区具有显著的可饱和吸收特性, 特别适合在 YAG 激光器上作调 Q 晶体^[2]。完全以受激布里渊散射相位共轭镜为后向反射镜, 得到了 SBS 自 Q 调的激光输出首先是在红宝石上做出来的^[4]。采用这个技术我们在 YAG 激光器上也曾得到比较好的结果。但是, 输出能量的稳定性不太好, 有时出现漏闪现象。在此基础上, 我们以 Cr⁴⁺: YAG 为调 Q 元件, 在频率 1Hz, 5Hz 和 10Hz 下获得了脉宽为 4.7ns 左右的激光输出, 稳定性大幅度提高。

1 数值模拟

* 国家教育部骨干教师资助项目。

作者简介: 刘丹平, 男, 1969 年 6 月出生。硕士研究生。主要从事激光技术、非线性光学、光通信研究。

收稿日期: 2001-03-02; 收到修改稿日期: 2001-07-11

1.1 理论模型

加入 Cr⁴⁺: YAG 后的 SBS 调 Q 过程可以这样描述: 泵浦初期, 由于透镜与输出镜之间(见图 1)所成非稳腔的腔内光子数较少, 静态输出激光的功率达不到 SBS 阈值能量, 同时, Cr⁴⁺: YAG 晶体处于高损耗状态, 腔内的损耗很大。随着光泵浦继续抽运, 反转粒子数的密度逐渐增加, 腔内的光子增多使 Cr⁴⁺: YAG 饱和, 透过率迅速上升, 很快激光的功率密度达到 SBS 阈值。SBS 发生后, 其后向散射是一个相位共轭镜, 反射率比较高, 腔内的损耗突然变小, 上能级粒子数迅速向下能级跃迁, 产生调 Q 巨脉冲输出。

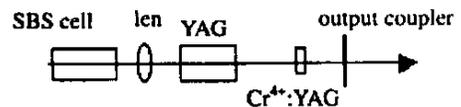


Fig. 1 Experimental setup of SBS phase conjugate resonator

由于调 Q 过程振荡十分迅速, 四能级系统的 Nd:YAG 从 ⁴I_{11/2} → ⁴I_{9/2} 的弛豫时间(约 30ns)比调 Q 脉宽大, 在激光跃迁的末能级上将堆积大量的粒子数, 所以, 在处理调 Q 问题时, 可将其当着三能级系统。同时, 由于 Q 开关脉冲时间持续很短, 可忽略激光介质饱和与吸收介质的自发辐射, 忽略光泵浦。由于灯泵浦时间很短, 可认为每个脉冲初始时

刻, 调 Q 晶体的 Cr⁴⁺ 全部处于基态, 于是得到速率方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi \left[\alpha_{cn} \frac{l}{L} - \sigma_{13cn1} \frac{l_s}{L} - \sigma_{24c}(n_s - n_1) \frac{l_s}{L} - \frac{\epsilon}{\tau_R} \right]$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -r\alpha_c \phi n \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -\sigma_{13c} \phi n_1$$

$$\epsilon = -\ln R_1 + 2\alpha l - \ln R^* \quad (2)$$

式中, n 为反转粒子数密度, ϕ 为腔内光子密度, 都用激光棒中掺 Nd³⁺ 离子浓度 ($N = 1.38 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 进行归一化处理。 l 为激活介质的长度, l_s 是 Cr⁴⁺:YAG 晶体的厚度, L 为激光腔长, $\tau_R = 2L/c$ 为光子在腔内往返已走的时间。 R^* 随时间发生变化: SBS 启动前的反射率很小, 当光强达到 SBS 阈值后, 反射率随泵浦光强增大, 可假设 $R^* = f(\phi) = A\phi$, 最后达到饱和。单程损耗 αL 大约为 0.01。激光介质反转因子 $r = 0.6^{[3]}$ 。激光介质发射截面 $\sigma = 8 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$ 。 n_1 是 Cr⁴⁺ 掺杂的浓度。 T_0 与 T_s 分别是初始透过率和饱和透过率 $T_0 = 20\%$, $T_s = 80\%$ 。 n_s 饱和介质基态粒子数密度。 Cr⁴⁺:YAG 的基态和激发态的吸收截面分别为: $\sigma_{13} = 4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-2}$, $\sigma_{24} = 8.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-2}$ 。

1.2 数值模拟

调 Q 时间取 15ns, 步长为 0.02ns, $n_0 = 1.498 \times 10^{-3}$, $\phi_0 = 1 \times 10^{-14}$, 采用四阶龙格库塔法数值模拟的激光介质、Cr⁴⁺:YAG 的粒子数反转和光子

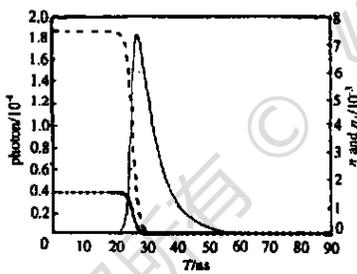


Fig. 2 Numerically calculated laser and Cr⁴⁺:YAG population inversion and the photon number as a function of time

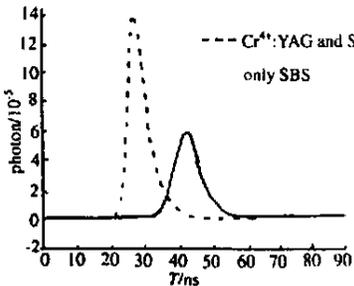


Fig. 3 Numerically calculated laser pulse of Q-switched with SBS and with Cr⁴⁺:YAG and SBS as a function of time

密度的变化如图 2 所示, 其中, 实线表示光子数变化; 虚线表示 Cr⁴⁺:YAG 基态粒子数的跃迁; 星线表示激活介质粒子数反转。激光脉冲输出的脉宽约为 5ns。如图 3 是仅用 SBS 调 Q 和

时使用两种调 Q 的模拟图形, 当使用 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 后, 脉宽变窄接近一半, 峰值功率增大到原来的近 3 倍。

2 实验研究

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示: 受激布里渊散射相位共轭腔由受激布里渊散射相位共轭镜和输出镜组成。YAG 棒的尺寸为 $f5\text{mm} \times 80\text{mm}$, 聚光腔为单灯泵浦紧包腔, 输出镜 $R = 30\%$, 池长 5cm, 选分析纯丙酮为散射介质, 因为它的 SBS 阈值低于 SRS 阈值, 增益比较大, 物理化学稳定性好, 泵浦能量在 SBS 阈值附近不会出现自聚焦, 不会被击穿^[1], 凝固点低、沸点高, 能满足实用化要求。透镜焦距 5.5cm, 背向激光器的凸面镀 1.06 μm 增透膜。Cr⁴⁺:YAG 调 Q 晶体镀 1.06 μm 增透膜, 初始透过率 $T_0 = 20\%$ 。用 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 晶体, 不仅增大了输出能量, 压窄脉宽, 明显改善了激光输出的稳定性, 没出现漏闪现象。脉冲波形由光纤探头和 Tek TDS544pps 型示波器测量, 输出能量由 OPHIR DGX 型能量计测量。

2.2 脉冲波形

图 4 是在重复频率 1Hz 下, 不加 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 晶体和加上调 Q 晶体时的波形图。可见, 加上 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 晶体, 脉宽从 10ns 左右减少到 4.7ns 左右。泵浦输入从 17J 增加到 27J, 脉冲波形变化不大, 重复率相当高。改变重复频率为 5Hz, 10Hz 时, 波形变化不大, 脉宽变化不大。

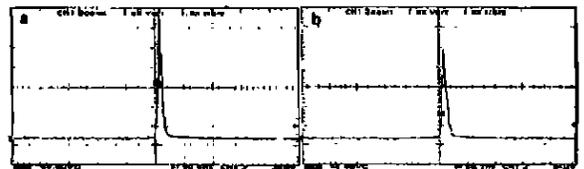


Fig. 4 Temporal profile of Q-switched with (a) SBS and (b) SBS and Cr⁴⁺:YAG at same time

2.3 输出能量特性

图 5 分别是只用 SBS 调 Q 和同时用两种方法调 Q 的输出能量平均值随泵浦能量的变化。只用 SBS 调 Q 时, 单峰区是 15J~17J, 17J~22J 是双峰区, 在 22J~30J 内是三峰区。使用 Cr⁴⁺:YAG 和布里渊介质同时调 Q 后, 19J~22J 是单峰区, 泵浦能量由 22J 增大到 30J, 输出能量增大约 2 倍。可见, 使用 Cr⁴⁺:YAG 和布里渊介质同时调 Q, 输出能量随泵浦能量增加更快, 仍有单峰区, 其范围更广。尽

管阈值增加,但是解决了只用SBS调 Q 时,输出能量随泵浦能量增加变化不大和输出的稳定性问题,尤其是后者。

同时用两种方法调 Q 时,首先打开调 Q 晶体,然后启动SBS。由于小型激光器的泵浦能量较小,所以,调 Q 晶体的初始透过率不能太小,否则不能打开调 Q 晶体,更别说启动SBS。初始透过率过大,起始腔初始 Q 较大,调 Q 效果不太好。实验中发现,初始透过率超过50%时,稳定性改善不明显。

2.4 输出能量稳定性的比较

图6是在相同的泵浦能量27J、重复频率5Hz时每隔5s时间统计的输出能量的变化。当仅用SBS调 Q 时,稳定性不太好,而同时使用两种调 Q 方法,稳定性得到改善。一方面输出能量的平均值上了一个台阶,另一方面,输出能量值最大和最小的变化幅度得到缩小。

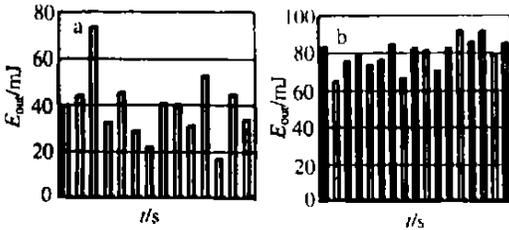


Fig. 6 Histogram of the laser pulse energy at a repetition rate of 5Hz by (a) Q -switching with SBS and (b) Q -switching with SBS and $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

2.5 实验结果分析

图2和图3揭示了系统的输出能量增多的原因:加入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 后,SBS发生前的损耗更大,SBS发生后的损耗更小,激光介质储能更多,于是输出激光越多。同时也说明了稳定性增加的原因。

Jackel等人的研究表明,当泵浦光的能量为阈值能量的5~10倍时可获得稳定输出的受激布里渊散射^[5]。小型激光器在静态时一般达不到这个水平,加入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 Q 晶体后,峰值功率幅度一般能提高到2~3个数量级^[6],这与我们的实验和理论模拟相符合。

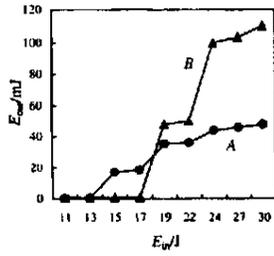


Fig. 5 Output energy as a function of the input energy at (a) the SBS- Q -switched mode (b) SBS and $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ - Q -switched mode

陈军等人的研究表明^[7],泵浦能量过高时,如果起始腔的 Q 值过高,会出现多脉冲现象,同时输出光斑的空间模式变差。而加入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 就解决了这个矛盾,虽然增加了起始腔的 Q 值,但改善了腔内的调 Q 属性。无需加大灯输入就可提高作用于布里渊介质的功率密度。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 是一个很好的腔内限模元件,它能减少腔内的高阶模,改善泵浦SBS介质的入射光质量,提高SBS反射率和相位共轭保真度。选择合适的初始透过率的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$,才能得到稳定的输出。此时在不同频率下,输出单脉冲,空间模式几乎为 TEM_{00} 模,光斑直径约为1mm,发散角极小,近场及远场光斑直径几乎不变化,已接近衍射极限。

另外,本实验在灯输入的泵浦能量达30J时未看见自聚焦和光感应击穿,只是当泵浦能量达到28J时开始损坏输出镜镀膜层。如何找到损伤阈值高的输出镜是进一步工作的难点。

3 结论

(1)小型的SBS调 Q 的YAG激光器随着能量的增大而出现的漏闪现象,并不是自聚焦、光感应击穿等非线性光学现象,而是由于SBS相位共轭反射镜的反射率的不稳定,引起输出能量的不稳定。要使SBS相位共轭反射镜的反射率稳定,可以通过改善激光器调 Q 属性来实现。(2) $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 最适合YAG激光器调 Q ,既是调 Q 元件,又是限模元件,在我们的实验中得到证实。小型SBS调 Q 的YAG激光器在使用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 后可以在1Hz,5Hz,10Hz的重复频率下稳定输出高质量的激光脉冲。

参考文献

- [1] 柳强,鞠有伦,王月珠 *et al.* 光学学报, 1999(8): 1089~1093.
- [2] Shimony Y, Burshtein Z, Kalisky Y *et al.* IEEE J Q E, 1996, 32: 305~310.
- [3] 张行愚,赵圣之,王青圃 *et al.* 光学学报, 1998(9): 1181~1184.
- [4] 王月珠. 自然科学进展——国家重点实验室通讯, 1991, 1(5): 455.
- [5] Jackel S, Shelev P, Lallouz R *et al.* Opt Commun, 1993, 101: 411~415.
- [6] Lando M, Shimony Y. Appl Opt, 2000, 39(12): 305.
- [7] 陈军,龙鹰,周月明. 中国激光, 1993, (6): 421~425.